



Università La Sapienza di Roma

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
Tesina per il corso di "Tecniche Audio Visive"

Charge Coupled Devices: tecnologia degli Image Sensors

Studente:

Marco Giovinazzi

Matricola: 788957

Professore:

Prof. Massimo Panella

*La fotografia acquista un po' della dignità che le manca
quando cessa di essere una riproduzione della realtà
e ci mostra cose che non esistono più.*

(Marcel Proust)

Indice

1. <u>Introduzione ai CCD</u>	<u>pag. 4</u>
2. <u>Schema di un CCD e suo funzionamento base</u>	<u>pag. 5</u>
2.1. <u>Esposizione: da luce in carica elettrica</u>	<u>pag. 6</u>
2.2. <u>Trasferimento di carica: le fasi dei CCD</u>	<u>pag. 7</u>
2.3. <u>Conversione e amplificazione: da carica a tensione</u>	<u>pag. 12</u>
3. <u>Principali tecniche di acquisizione digitale dell'immagine</u>	<u>pag. 12</u>
3.1. <u>Point Scanning</u>	<u>pag. 12</u>
3.2. <u>Line Scanning</u>	<u>pag. 13</u>
3.3. <u>Area Scanning</u>	<u>pag. 14</u>
4. <u>Architetture di Base degli attuali CCD</u>	<u>pag. 15</u>
4.1. <u>Full Frame Transfer</u>	<u>pag. 16</u>
4.2. <u>Frame Transfer</u>	<u>pag. 17</u>
4.3. <u>Interline Transfert</u>	<u>pag. 18</u>
5. <u>Il colore nei CCD</u>	<u>pag. 20</u>
5.1. <u>Color Sequential</u>	<u>pag. 20</u>
5.2. <u>Three-Chip Color</u>	<u>pag. 21</u>
5.3. <u>Integral Color Filter Arrays (CFA)</u>	<u>pag. 22</u>
6. <u>Attuali innovazioni e loro evoluzioni</u>	<u>pag. 24</u>
6.1. <u>Kodak CCD</u>	<u>pag. 26</u>
6.2. <u>Fujifilm Super CCD</u>	<u>pag. 29</u>
6.3. <u>Sony EXview - Super HAD CCD</u>	<u>pag. 32</u>
6.4. <u>Foveon Sensors</u>	<u>pag. 34</u>
7. <u>Bibliografia</u>	

1. Introduzione ai CCD

Come succede spesso nell'elettronica, i CCD (Charge Coupled Devices – dispositivi accoppiati in carica) sono stati pensati all'inizio come soluzione ad un problema specifico per poi evolversi in direzioni completamente differenti. La loro nascita risale al 1960, quando i Bell Labs annunciarono un innovativo tipo di circuiti per la memorizzazione di informazione su elaboratori numerici. La conferma del reale funzionamento di questi circuiti e la costruzione dei primi modelli funzionanti risale ai primi anni del '70.

Solo successivamente le enormi potenzialità di questa tecnologia vennero a galla: la loro velocità permetteva il loro uso nel *signal processing* e la particolare sensibilità (dovuta alla natura del substrato di silicio adottato per la loro costruzione) alle lunghezze d'onda minori dei $1,1 \mu\text{m}$ (lo spettro del visibile cade dai $0,4 \mu\text{m}$ ai $0,7 \mu\text{m}$) li rendeva particolarmente efficaci nell'acquisizione di immagini.

Ad oggi i CCD hanno raggiunto livelli prestazionali notevoli. La tecnologia di fissaggio dei singoli chip su wafer di silicio è andata sempre migliorandosi e il livello di miniaturizzazione (come in molti altri ambiti) è divenuto molto alto.

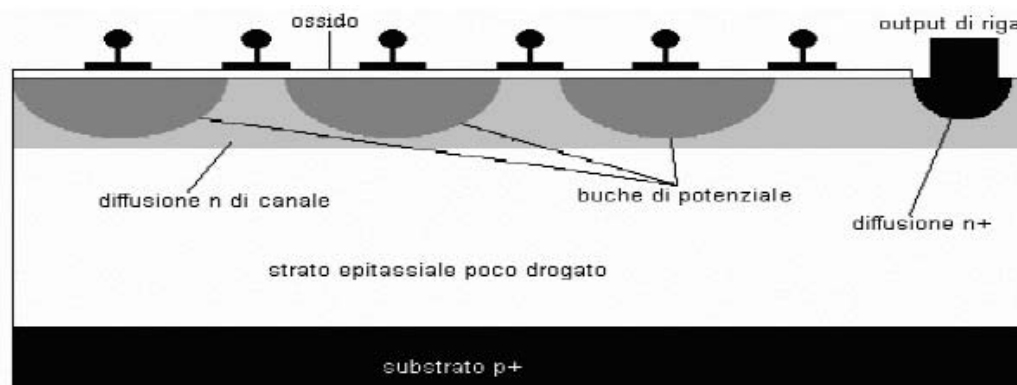
Questo fa sì che i CCD si siano confermati come tecnologia di riferimento per l'acquisizione di immagini fisse e mobili in moltissimi campi applicativi.

2. Il funzionamento base degli Image Sensors

2.1. Schema di un CCD e suo funzionamento base

I dispositivi ad accoppiamento di carica CCD (Coupled Charge Devices) sono, in sostanza, *shift-registers* lineari formati da una serie di gate MOS sopra una diffusione n "di canale". Tipicamente quest'ultima viene operata sopra uno strato epitassiale poco drogato cresciuto sul substrato p^+ , al fine di ottimizzare la raccolta di carica.

Quando una particella (fotone) attraversa lo strato epitassiale, gli elettroni liberati da essa, vengono trasportati dal campo elettrico generato internamente, dalla giunzione di canale n/p epitassiale, verso la diffusione n di canale.



L'applicazione di una tensione ad uno dei gate MOS comporta la creazione di una buca di potenziale localizzata sotto di esso, che tende a raccogliere gli elettroni giunti così alla diffusione n . A questo punto, la carica presente sotto ciascun gate MOS è direttamente proporzionale alla distanza del gate stesso dal punto di incidenza della particella; non è però possibile una lettura diretta ai contatti di gate, in quanto essi

sono schermati dalla carica da uno strato di materiale isolante (ossido). Tuttavia, accendendo e spegnendo opportunamente i gate, è possibile muovere le varie buche di potenziale all'interno della diffusione n di canale e, assieme con queste, i pacchetti di carica contenuti in esse. Si può così realizzare una lettura seriale dell'intera riga per mezzo di una diffusione finale di output.

Questa è la base teorica del funzionamento dei CCD, che nel seguito del documento sarà ripresa più volte.

Nella pratica, i sensori di tipo CCD raccolgono l'informazione luminosa attraverso un processo a 3 fasi:

1. Esposizione: in questa fase la luce viene convertita in carica elettrica suddivisa in unità discrete (pixels).
2. Trasferimento di Carica: i pacchetti di carica vengono trasferiti attraverso il substrato di silicio.
3. Conversione e amplificazione: la carica viene convertita in tensione e l'output viene opportunamente amplificato.

2.2. Esposizione: da luce in carica elettrica

Come detto, quando le particelle di luce incidente (fotoni) cadono sull'array di pixel (sensori), l'energia associata a ciascun fotone viene assorbita dal silicio e causa una reazione. Questa comporta la generazione di una buca di potenziale, e quindi il movimento di carica (vengono liberati elettroni).

Il numero di elettroni "catturati" da ogni pixel è dipendente in modo lineare dal tempo di esposizione e dalla luce presente (come del resto nella fotoimpressione su pellicola,

anche se i CCD si comportano molto peggio in assenza di luce) ed in modo non lineare dalla lunghezza d'onda (fig.2.2.1).

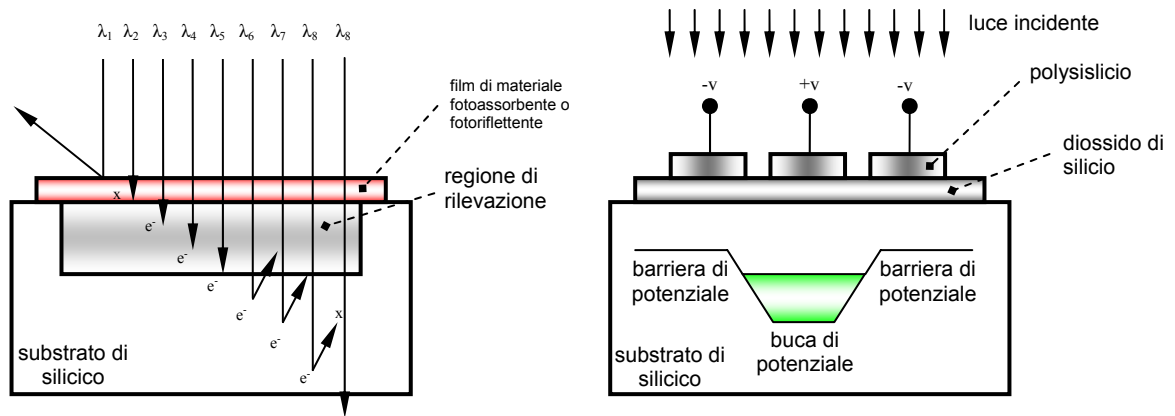


fig. 2.2.1 – Schema base di un rivelatore CCD

La capacità del sensore di raccogliere fotoni è legata ad una lunga serie di fattori che vanno dalla qualità del silicio stesso al suo spessore. Per altro spesso vengono fatti depositare in fase di fabbricazione materiali foto-riflettenti o foto-assorbenti per determinate lunghezze d'onda; questo sistema regola l'assorbimento delle particelle di luce permettendo la loro penetrazione a differenti profondità del substrato, riducendo così la perdita di informazione causato dalla caduta di alcuni degli elettroni indotti in regioni di non rilevazione (regioni nascoste).

2.3. Trasferimento di carica: le fasi dei CCD

Nel momento in cui la carica è stata rilevata e catturata pixel per pixel, nasce la necessità di trasferirla fuori del sensore verso un amplificatore (separato fisicamente) al

fine di gestire il suo contenuto informativo (particolare informazione luminosa associata).

Per far questo si usano 4 differenti tecniche di trasferimento di carica. E' importante notare che in tutti i casi quello che si muove realmente non è la carica associata ad un singolo pixel, ma quella relativa ad una intera riga o colonna. Si introduce perciò il concetto di fasi (colpi di clock necessari) legata in modo diretto al numero di gate presenti sul sensore.

- 4-Phase CCD (4 ϕ)

Sono usati 4 gate diversi ($\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$) per ogni pixel. Come da figura 2.3.1 si può vedere che tenendo alto il livello di ϕ_1 e ϕ_2 e basso quello di ϕ_3 e ϕ_4 questi ultimi formano una barriera di potenziale (e si crea quindi una buca di potenziale). Una volta esposto il sensore alla radiazione luminosa si invertono le fasi di ϕ_1 e ϕ_3 in modo da far muovere i pacchetti di carica da ϕ_2 a ϕ_3 . Allo stesso modo cambiando

la fase di ϕ_2 e ϕ_4 la carica è costretta a muoversi verso ϕ_4 . Applicando questo processo ad una intera riga e fino a quando la carica presente sul primo pixel è arrivata all'uscita dell'n-esimo sensore si realizza il trasferimento di carica.

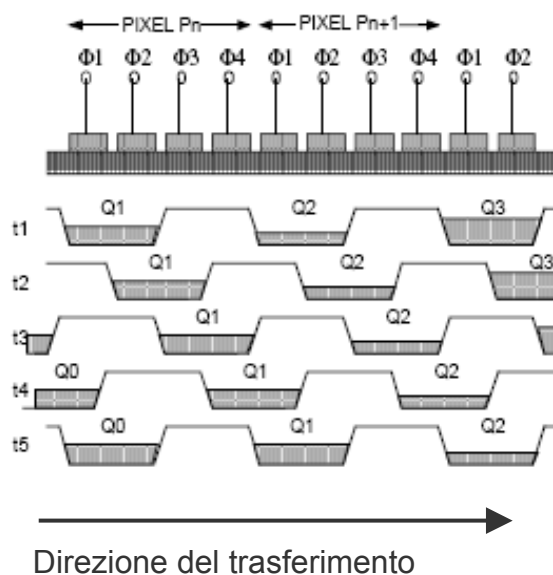


fig. 2.3.1 - 4-Phase CCD (4 ϕ)

- 3-Phase CCD (3 ϕ)

Il principio di questo tipo di tecnica è lo stesso del caso precedente, fatta

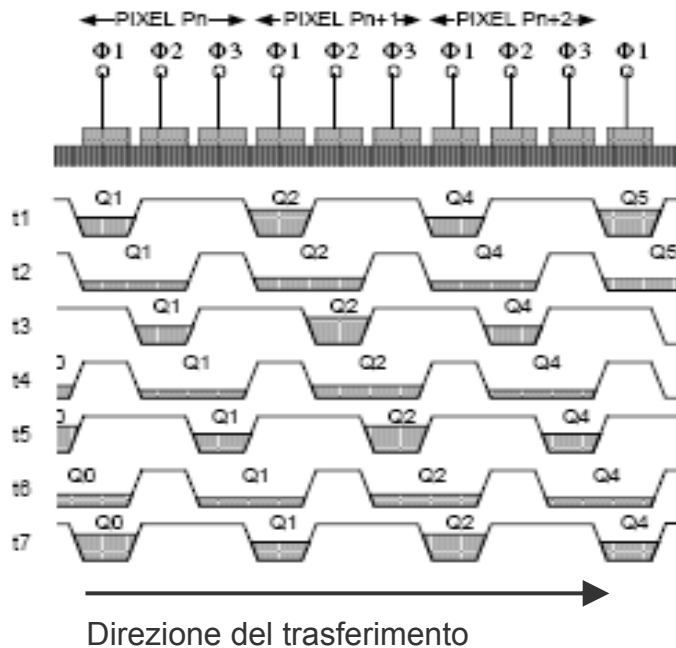


fig. 2.3.1 - 3-Phase CCD (3 ϕ)

eccezione per il numero di gate utilizzati, 3 invece che 4 (fig. 2.3.2). Il movimento delle cariche avviene nello stesso modo.

Il vantaggio di questa tecnica risiede nel fatto che meno gate corrispondono a maggior densità di sensori nello strato di silicio e quindi maggiore risoluzione spaziale.

Lo svantaggio, invece, sta nella più complicata sincronizzazione del processo di clock e nel conseguente aumento di velocità dell'oscillatore che lo pilota.

- 2-Phase CCD (2 ϕ) e Pseudo-2-Phase CCD (p-2 ϕ)

Anche se hanno un nome simile, queste due tecniche sono molto differenti e orientate a due fini diversi. La prima (2 ϕ) è estremamente compatta e permette di raggiungere elevatissime densità, utilizzando solo 2 gate (fig. 2.3.3). Come è chiaro,

il suo svantaggio sta nel sistema di pilotaggio, che deve essere estremamente sensibile e veloce.

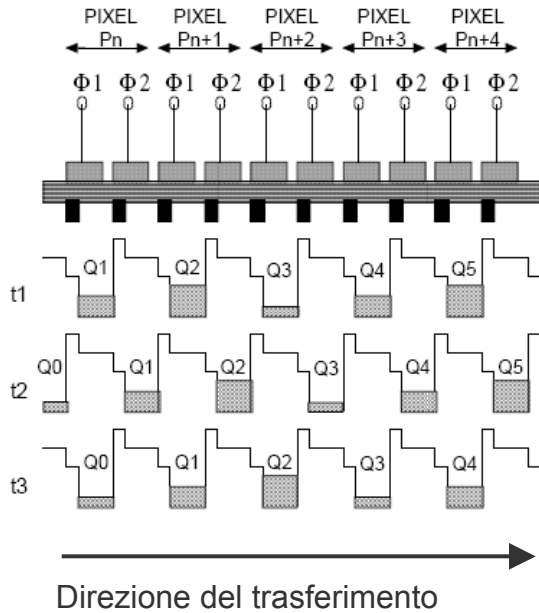


fig. 2.3.3 - 2-Phase CCD (2φ)

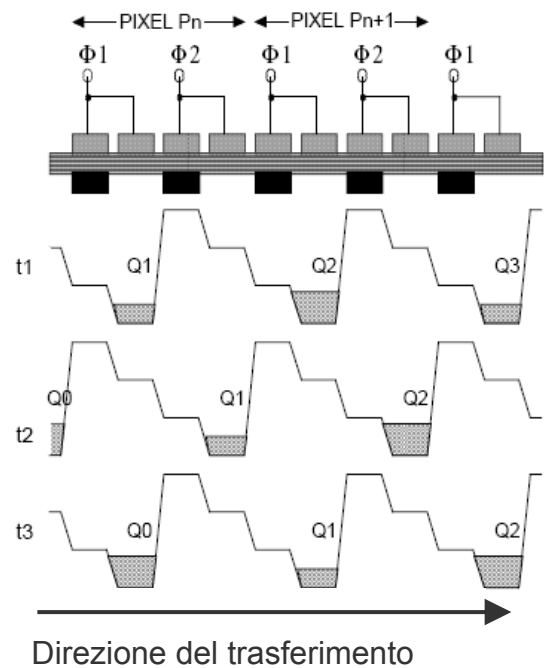


fig. 2.3.4 - Pseudo-2-Phase CCD (p-2φ)

La seconda (p-2 φ), invece, emula quello che succede nel 4 φ agganciando però i gate due a due (fig. 2.3.4). In questo modo da una parte si riduce la complessità del sistema, ma dall'altra è necessario un processamento più complicato.

- Virtual Phase CCD ($V\phi$)

Il numero di gate per pixel di questa tecnica è al minimo: uno solo (fig. 2.3.5). E' caratteristica l'assenza di elettrodi di polisilicio tra i gate, cosa che aumenta moltissimo la sensibilità di questi apparati alla luce (soprattutto nella lunghezza d'onda del blu).

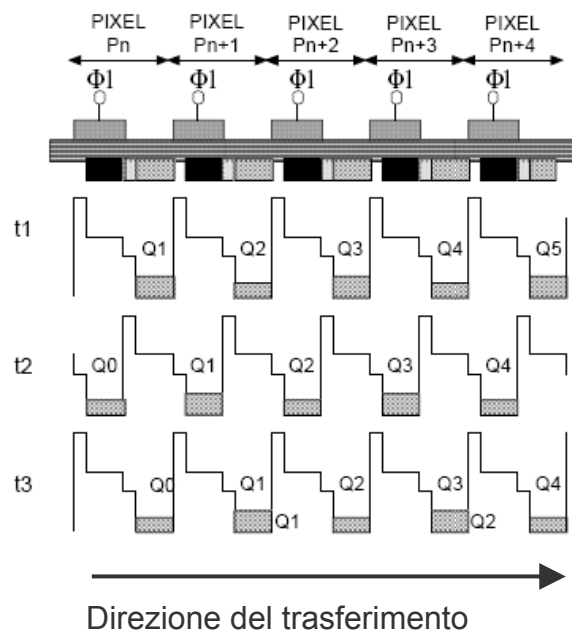


fig. 2.3.5 - Virtual Phase CCD ($V\phi$)

In questo modo la densità raggiunta è estrema e la risoluzione molto alta, anche se il clock necessario per pilotare i gate lo è altrettanto. Tuttavia per questa tecnica rimangono da risolvere problemi di degradazione delle prestazioni ancora aperti, dovuti probabilmente alla complessità del multi-impianto sul silicio.

2.4. Conversione e amplificazione: da carica a tensione

Una volta usciti dalla catena di trasferimento, gli elettroni (la carica elettrica) viene convertita in tensione, in modo da poterla amplificare e utilizzare come informazione luminosa da elaborare. I circuiti che realizzano questa tecnica sono per lo più di tipo *source follower* o loro evoluzioni. Le differenze nei livelli utilizzati determinano il segnale e quindi l'immagine acquisita.

3. Principali tecniche di acquisizione digitale dell'immagine

Una immagine digitale, a monte di eventuali compressioni avanzate basate su contenuto spettrale o simili (jpeg, tiff, etc...) è rappresentata come una matrice di elementi significativi che contengono ognuno l'informazione associata ad un pixel. Prescindendo dalla natura di questi elementi (b/n o colore), i metodi per assegnare il contenuto informativo al singolo elemento (*scanning*) sono tre: point scanning, line scanning o area scanning.

3.1. Point Scanning

La rilevazione viene fatta pixel per pixel da un sensore capace di selezionarne uno solo tra tutti. Ad ogni pixel, quindi, è assegnato un sistema di coordinate XY che ne identifica la posizione. La scansione viene poi perpetrata muovendosi su righe (o su colonne) sequenziali (fig. 3.1.1).

I vantaggi di questa tecnica stanno nell'alta risoluzione, nell'uniformità dei valori assunti (non sono influenzati pixel vicini) e nella semplicità del sensore (anche nel costo). Gli svantaggi, invece, stanno nei requisiti di calibrazione del sensore (errori nella posizione determinano alta perdita di informazione) e la complessità dei meccanismi meccanici che regolano il movimento del rilevatore e che devono essere il più veloce possibile (a meno di tollerare tempi di acquisizione alti).

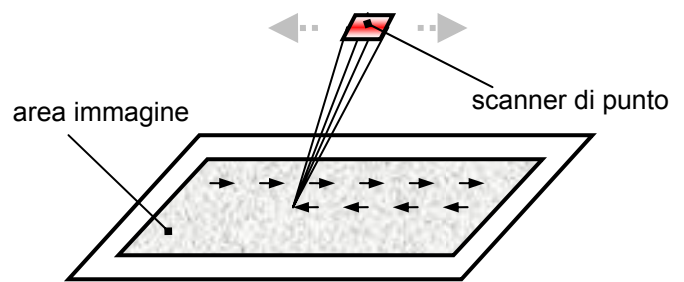


fig. 3.1.1 – Point Scanning

3.2. Line Scanning

Nel Line Scanning una schiera di sensori di scansione di punto elaborano parallelamente una intera riga (o colonna) dell'immagine da acquisire muovendosi uniformemente (fig. 3.2.1). In questo modo non solo si rende più veloce (perché parallela) la scansione ma anche la successiva lettura dei dati.

La lunghezza del sensore di scansione è limitata principalmente dalla dimensione del wafer che deve ospitare i rilevatori. Dato che il costo di un wafer cresce esponenzialmente con la sua dimensione (è più difficile raggiungere gli alti gradi di purezza necessari al crescere della dimensione richiesta) si preferisce generalmente affiancare più dispositivi (opportunosamente calibrati) di dimensione minore.

I vantaggi di questi sistemi sono prestazionali: il tempo di scansione è sensibilmente minore rispetto a quello necessario per il point scanning, anche se

ancora troppo elevato per particolari applicazioni real time. La resa (in termini di risoluzione) è comunque buona, anche se le inevitabili non uniformità nei singoli

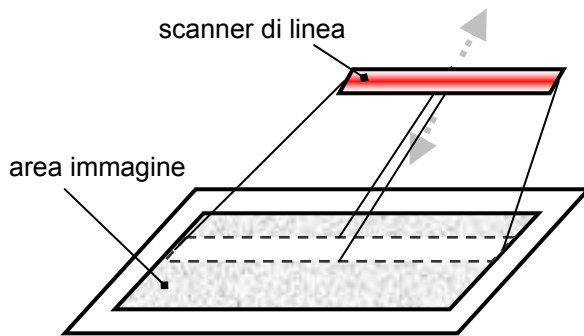


fig. 3.1.2 – Line Scanning

elementi (corrette a posteriori) possono essere degradanti. D'altro canto, anche se i meccanismi di posizionamento e scansione sono molto meno complicati e delicati rispetto al caso precedente, questo tipo di sensori ha un prezzo maggiore

(come già detto, il prezzo dei wafer di silicio cresce esponenzialmente con la loro dimensione).

3.3. Area Scanning

Più elementi di scansione di punto possono essere accoppiati a formare array di sensori capaci di acquisire un intero quadro (o un suo sottoquadro) in un solo colpo,

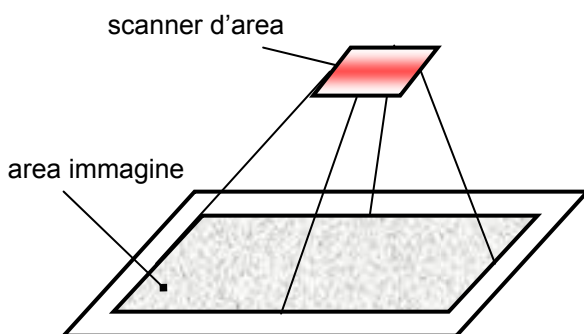


fig. 3.1.4 – Area Scanning

senza la necessità di meccanismi di posizionamento meccanici che comportano ritardi, o nel caso peggiore, disallineamento spaziale e consecutiva sovrapposizione

con perdita di informazione utile (fig. 3.3.1).

La complessità di questi sistemi quindi è ridotta al minimo, e i tempi di acquisizione sono molto bassi. Tuttavia il costo del wafer è più alto che negli altri casi e c'è la forte limitazione che la risoluzione è completamente bloccata, essendo fisse entrambe le direzioni di scansione.

Questo tipo di dispositivi è il più utilizzato nelle applicazioni non professionali.

4. Architetture di base degli attuali CCD

Le architetture utilizzate per il trattamento dei singoli pacchetti rilevati dagli elementi del CCD sono varie. Attualmente le più utilizzate sono tre:

1. Full Frame Transfer
2. Frame Transfer
3. Interline Transfer

Le prime due sfruttano come rilevatori i fotocapacitori dei transistor MOS, l'ultima unisce a questa caratteristica anche quella di utilizzare fotodiodi. E' importante considerare che le osservazioni fatte in questa sezione sono applicabili tanto ai CCD che lavorano in area scanning quanto a quelli in line scanning.

Nel seguito queste tre architetture sono analizzate in dettaglio.

Altre architetture tipiche sono quelle di Frame-Interline Transfert, Accordian, Charge Injection e Mos XY addressable, ma troppo specifiche e poco utilizzate in pratica nei comuni sensori CCD (e non trattate in questo documento).

4.1. Full Frame Transfer

I FF-CCD hanno una architettura molto semplice e facile da realizzare (basso costo di fabbricazione e di utilizzo). Sono composti da uno shift register CCD parallelo, uno seriale e un amplificatore d'uscita sensibile al segnale in ingresso (fig. 4.1.1). L'immagine è otticamente proiettata lungo una griglia bidimensionale formata da rilevatori e quantizzata al pixel. Le intere colonne rilevate, in questo caso, sono spedite in parallelo al registro seriale che popola l'ingresso dell'amplificatore ricostruendo in vari passi l'immagine. Dal momento che i registri paralleli sono utilizzati sia per

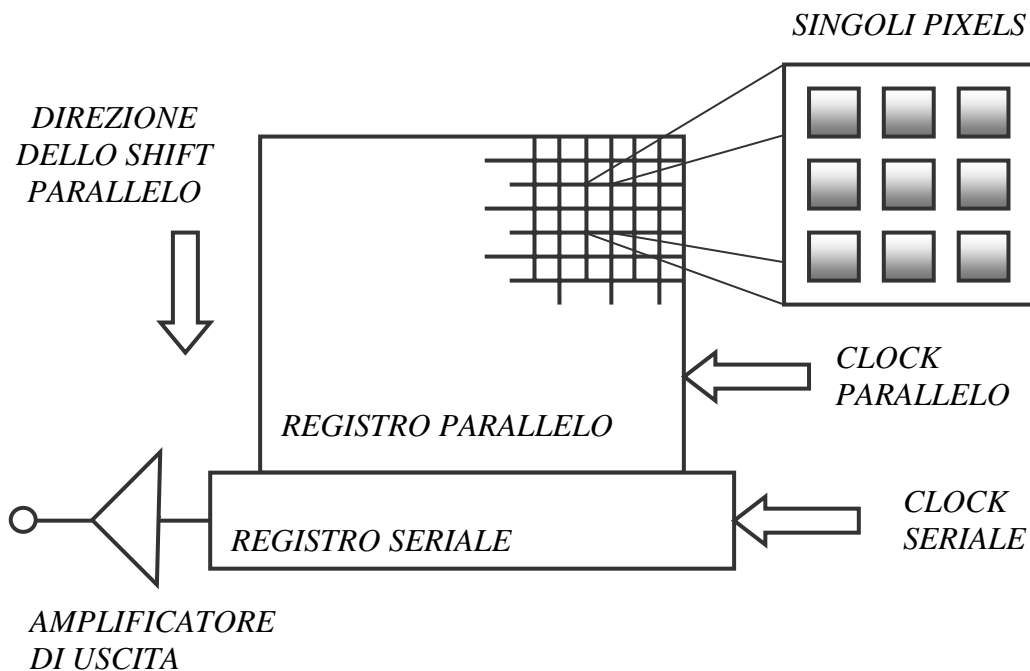


fig. 4.1.1 – Full Frame Transfer

l'acquisizione dei quadri che per la lettura degli stessi, un otturatore meccanico o un illuminatore sincronizzato sul segnale di *strobe* devono essere presenti per preservare l'integrità delle immagini.

Per la semplicità architettonica e i bassi costi realizzativi, questo tipo di architettura fornisce buone prestazioni, unite alle alte risoluzioni raggiungibili per la possibilità di creare sensori ad alta densità.

4.2. Frame Transfer

L'architettura FT (Frame Transfer) è per molti versi simile a quella FF. La differenza sostanziale sta nell'aggiunta di un registro parallelo non sensibile alla luce, detto registro di *storage* (fig. 4.2.1).

L'idea di base è quella di trasferire in modo parallelo e veloce l'informazione catturata dal array fotosensibile (array di immagine) dentro quest'ultimo, e eseguire la lettura dei dati sequenziale come nel caso FF. Con questo sistema si riesce ad aumentare il massimo frame rate del sistema permettendo anche la ripresa di quadri senza che un meccanismo di tipo otturatore meccanico intervenga per permettere la separazione tra di essi (otturatore elettronico).

Tuttavia questa architettura richiede un sistema di controllo molto più sensibile rispetto a quello del caso precedente, dato che a causa del trasferimento dei dati tra i due registri paralleli, se i frame sono troppo vicini temporalmente si possono generare delle macchie (*smear effect*) sull'immagine acquisita.

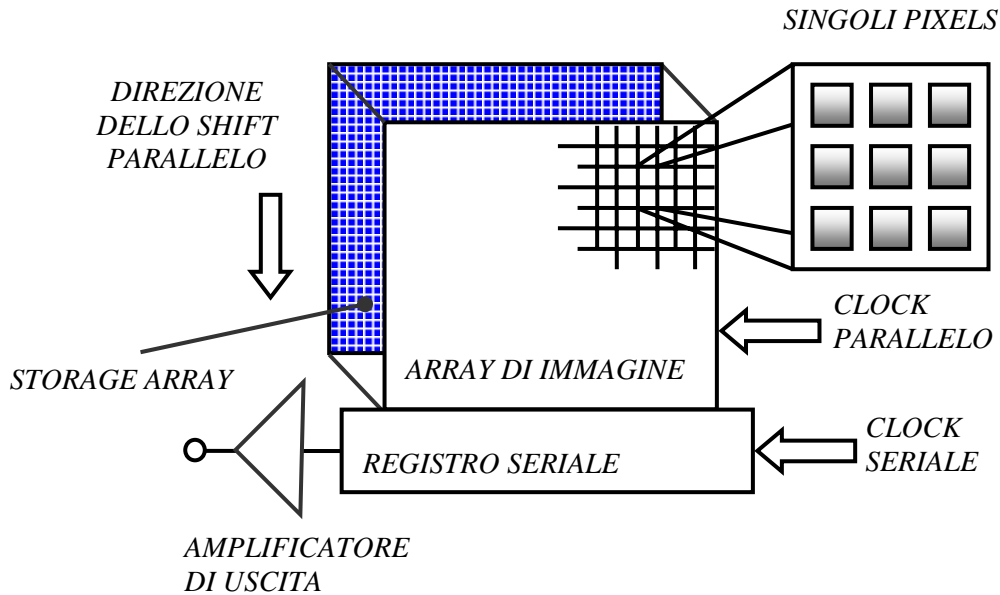


fig. 4.2.1 – Frame Transfer

A causa della duplice natura di questo tipo di architettura il costo di questi apparati è molto maggiore rispetto al caso precedente, e la qualità finale dell'immagine è sensibilmente più bassa, essendo studiati per l'acquisizione di quadri in rapida sequenza temporale ma con ridotta risoluzione spaziale.

4.3. Interline Transfer

I IL-CCD (InterLine) sono nati per incorporare la velocità di trasferimento (e quindi di acquisizione) dei dispositivi FT senza avere la necessità di utilizzare un secondo strato di memorizzazione. Si realizzano quindi sullo stesso wafer due regioni differenti, una formata dagli elementi fotosensibili, l'altra utilizzata solo per il trasferimento dei dati (fig. 4.3.1). Appena l'immagine è stata rilevata i dati relativi sono trasferiti nella struttura parallela isolata dall'esterno (non ricevono direttamente

la luce) e letti sequenzialmente. Durante questa fase è possibile una nuova operazione di cattura, raggiungendo frame rate molto elevati.

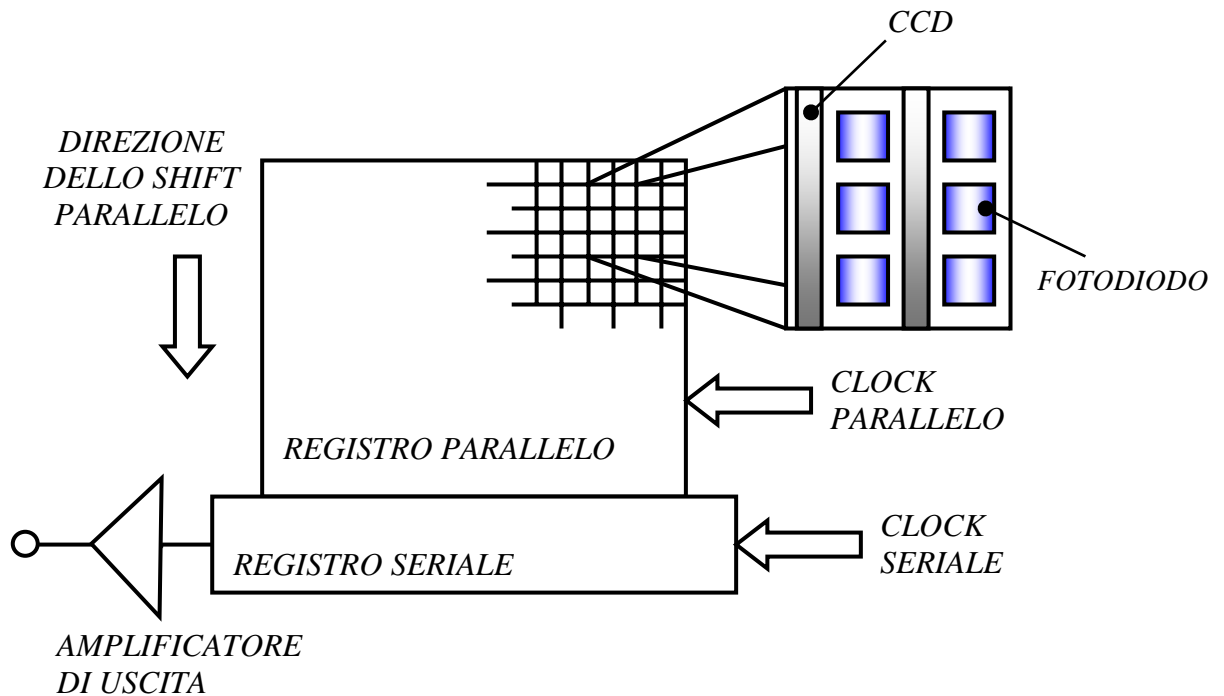


fig. 4.3.1 – Interline Transfer

Come detto, il vantaggio principale di questo tipo di architettura è la sua velocità: mentre un quadro è immagazzinato l'altro è in fase di lettura. Tuttavia il loro costo è molto elevato (doppia struttura) e la loro risoluzione limitata, dato che è minore (o solo meno densa) la distribuzione spaziale dei rilevatori fotosensibili e molto breve il tempo di esposizione. Inoltre perché questi sistemi funzionino in modo corretto bisogna prevedere meccanismi di correzione della sovrapposizione, dato che i fotodiodi molto vicini al CCD possono portare a fenomeni di *lag* in frame successivi.

5. Il colore nei CCD

I CCD basati su tecnologia al silicio sono monocromatici per natura: non hanno la caratteristica di determinare le variazioni di rosso, verde e blu dall'informazione raccolta dai rilevatori a livello di pixel in modo diretto. Per permettere a questi sistemi di raccogliere l'informazione di colore si utilizzando principalmente tre tecniche differenti, l'una o l'altra a seconda della particolare applicazione a cui il sensore è destinato. In ogni modo, il problema comune del colore nei CCD è la non corretta sintetizzazione del segnale (colore discretizzato): la quantità di informazione da elaborare risulta sempre tripla rispetto al bianco e nero.

5.1. Color Sequential

In questo tipo di sensori il rilevatore è esposto alla scena tre volte consecutive, mentre un filtro specifico separa le componenti di colore volta per volta (fig. 5.1.1).

Questo porta a risoluzioni altissime (quella naturale del CCD), ma il tempo di esposizione (triplicato), il basso frame rate che questi sistemi producono e le parti meccaniche necessarie (punto critico di ogni sistema di precisione) costituiscono delle forti limitazioni.

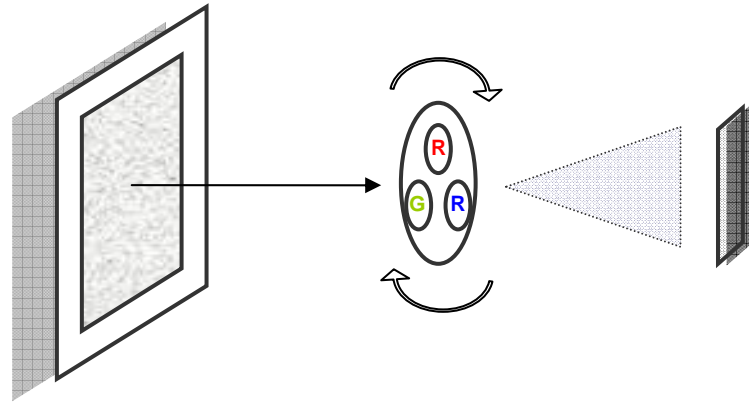


fig. 5.1.1 – Color Sequential

Inoltre i costi di realizzazione crescono non linearmente al salire della risoluzione richiesta e della precisione (soprattutto per la parte meccanica). Questo porta all'applicazione pratica di questi CCD solo in applicazioni in cui il quadro da acquisire non è in movimento (o se lo fosse sarebbe il tempo di variazione sarebbe comunque trascurabile rispetto a quello di analisi), l'errore non è tollerato e la precisione richiesta è altissima, come in campo medico o militare. Sensori di questo tipo ma di basso profilo sono stati utilizzati in passato nell'acquisizione di immagine amatoriale (scanner economici o simili).

5.2. Three-Chip Color

Questi sistemi utilizzano un filtro ottico (un prisma) per separare l'informazione di colore prima dell'acquisizione e tre CCD identici per raccoglierne ogni singola componente (fig. 5.2.1).

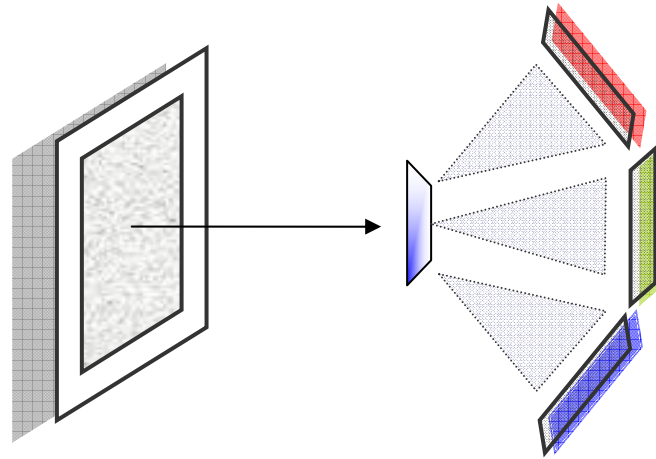


fig. 5.2.1 – Three-Chip Color

Come facilmente immaginabile il costo del sistema è triplice (tre sensori) ma le prestazioni in termini di frame rate sono molto più alte rispetto al tipo precedente. Il limite principale però sta nella difficoltà di calibrare da una parte il sistema ottico e dall'altra il sincronismo dei tre sensori in modo da avere una corretta sovrapposizione dei quadri contenenti le varie informazioni di colore (assenza di sfocature). D'altro canto la risoluzione raggiungibile è elevatissima e non è richiesta una triplice esposizione come nel caso precedente. Essendo una evoluzione del CS le applicazioni che utilizzano i sensori TCC sono pressappoco le stesse: l'utilizzo di tre sensori ne pregiudica l'uso in sistemi a basso costo o amatoriali. Spesso, invece, si trovano questi sistemi in apparecchiature dedicate ad applicazioni di tipo professionale come foto/videocamere da studi fotografici e/o cinematografici.

5.3. Integral Color Filter Arrays (CFA)

L'idea di questa tecnologia è semplice: si suddivide il compito di rilevare le componenti primarie della luce tra sensori vicini. Si piazzano perciò dei fotoresistori

sensibili alle diverse frequenze di colore in modo diffuso sul sensore (o uno strato di filtri ottici direttamente sui transistor) affinché si realizzi una struttura reticolare capace di acquisire una intera immagine a colori in modo parallelo (fig. 5.3.1).

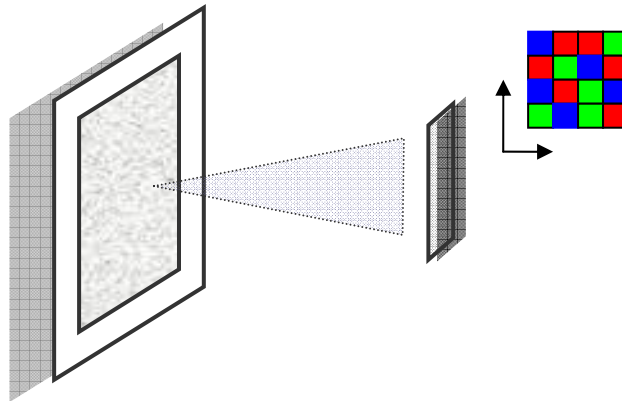


fig. 5.3.1 – Integral Color Filter Array (CFA)

In questo modo si riduce notevolmente la complessità del sistema: non c'è bisogno di utilizzare una struttura meccanica di filtri come nell'approccio CS né di impiegare tre sensori diversi e uno *splitter* ottico come nel TCC. Questa particolare soluzione (ad oggi la più diffusa) crea però dei problemi notevoli: il primo è di certo quello della risoluzione, in quanto il sensore memorizza pixel per pixel un colore primario (RGB) o una combinazione (CMY), non tre diversi dati di colore per ogni pixel; il secondo invece sta nel fatto che ci sono dei buchi di lettura, visto che parte dell'informazione relativa ad un colore deve essere ricostruita nei punti in cui il sensore ne rileva altri.

Nonostante questi inconvenienti questo tipo di sensori sono ad oggi i più utilizzati in pratica, dato che l'estrema miniaturizzazione e l'impiego di nuove tecnologie (come le microlenti) ha permesso di raggiungere alti risultati in termini di qualità di immagine ad un prezzo notevolmente inferiore rispetto ad architetture di altro tipo.

Tutti i CCD oggi in commercio (a parte i FOVEON come descritto successivamente e quelli per applicazioni dedicate) funzionano in questo modo.

6. Attuali innovazioni e loro evoluzione

Per quanto la tecnologia degli image sensors sia divenuta matura negli ultimi anni e sia in ancora in continua evoluzione (le nuove frontiere non solo sono rappresentate dal miglioramento della miniaturizzazione per raggiungere risoluzioni sempre più alte, ma anche da nuovi tipi di architetture, addirittura sfruttando nanotecnologie, con abbandono delle correnti strutture di tipo capacitivo), i risultati ottenibili con tecnologie analogiche sono senza dubbio migliori. Le riprese video in studi di produzione di alto livello vengono ancora effettuate con videocamere a tubo, la qualità dell'immagine delle macchine a pellicola professionali è molto superiore rispetto al CCD.

Nel seguito di questo documento saranno analizzate le ultime evoluzioni dei sensori di marchio Kodak, Sony e Fuji, attualmente leader indiscussi del mercato, insieme ad una breve descrizione della nuova tecnologia "foveon", che per sua struttura rappresenta la prima vera evoluzione architettuale nel campo degli *image sensors* dall'introduzione dei CCD.

Per completezza, è fornita qui anche una descrizione concettuale del funzionamento della "vecchia" pellicola fotografica, ancora protagonista indiscussa

del settore professionale (anche se è notizia di pochi giorni fa l'abbandono da parte della kodak della produzione di pellicole in bianco e nero...).

La pellicola fotografica (fig. 6.1) non è altro che una emulsione contenente una sostanza sensibile alla radiazione luminosa, come il nitrato d'argento (AgNO_3). Questi materiali nell'esposizione alla luce solare (bombardamento di fotoni) tendono



fig. 6.1 – Pellicola fotografica al microscopio

a trasformarsi mediante ossidoriduzione liberando così argento metallico. Nella pellicola in bianco e nero il nitrato d'argento è distribuito in forma microscopica su un supporto polimerico (poliestere o acetato di cellulosa). Nelle pellicole a colori moderne gli strati fotosensibili sono costituiti da sali d'argento con cristalli di grandezza variabile legata alla sensibilità della pellicola. Questi sali sono di natura

diversa a seconda della capacità di rilevare particolari frequenze luminose e intervallati da strati trasparenti o (in particolari pellicole) da micro-filtri polarizzati, per incrementare la capacità del singolo strato di discriminare la componente di colore (in pratica si elimina il residuo della radiazione luminosa assorbita dallo strato immediatamente superiore). L'ordine degli strati è su base lunghezza d'onda (blu, verde, rosso).

6.1. Kodak CCD

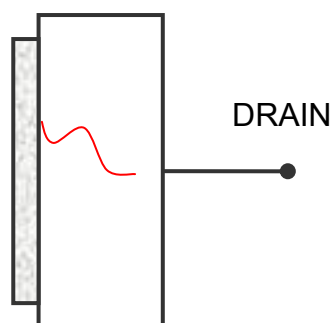
I CCD Kodak di ultima generazione presentano migliorie su differenti campi. Attualmente la massima risoluzione offerta è dell'ordine dei 22 MegaPixel e la loro qualità è paragonabile a quella dei suoi principali concorrenti. Sono prodotti in vari tipi, in vari tagli e in varie architetture differenti.

Le principali innovazioni apportate sono (a parte la densità sempre maggiore dei rilevatori sullo strato di silicio, conseguenza dell'affinamento delle tecniche di miniaturizzazione dei componenti):

- **Tecnologia *Anti Blooming*: VOP e LOD**

Il "blooming" è un effetto caratteristico dei sensori CCD. Come già detto, la quantità di carica mossa dal sensore è direttamente proporzionale alla quantità di luce raccolta durante l'esposizione. Quando il tempo di esposizione diviene troppo lungo si verifica un effetto di "bloom" tra pixel vicini, cioè la corruzione dell'immagine a causa di artefatti derivati da un eccesso di carica propagatasi sullo strato esterno del sensore.

Per alleviare questa degradazione si utilizzano VOP e LOD (Vertical – Lateral



Overflow Drain). Il VOD è una barriera di potenziale elettrostatico (minore di quello intra-pixel) sul substrato più basso della struttura. Viene aggiunto in pratica un *drain* alla struttura del sensore (fig. 6.1.1). In

questo modo la carica in eccesso si propaga su questa struttura aggiunta.

Il LOD invece è un sistema di drain inserito direttamente sullo strato siliconico (fig. 6.1.2): questo permette di assorbire meglio del solo VOD la carica in eccesso.

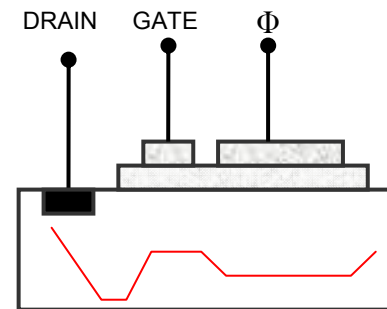


fig. 6.1.2 – Lateral Overflow Drain (LOD)

- **Silicon Thinning**

Come detto in precedenza, gli strati immediatamente superiori ai rilevatori (pixels) assorbono o riflettono la luce in base alla particolare frequenza. Gli elettroni creati sulla superficie più alta, però, sono in parte persi a causa di ricombinazioni che avvengono negli strati più bassi. Per questo motivo la sensibilità alla radiazione ultravioletta o blu è minore (principale fattore che li rende qualitativamente inferiori all'acquisizione analogica). E' possibile assottigliare il wafer fino a portarlo sui 10-15 μm . In questo modo il sensore può essere retro-illuminato accentuando la risposta ai raggi blu e UV. Questa tecnica è limitata ad architetture FF o FT e impedisce la creazione di strutture di tipo VOD. Il principale problema di questi sistemi è che hanno un notevole costo realizzativo e sono molto difficili da maneggiare anche con strumenti meccanici di precisione.

- **UV Enhancement Coating**

Altro modo di aumentare la risposta a frequenze UV o blu è quello di distribuire sul sensore uno strato di fosfori UV/blu sensibili, che sono trasparenti ai $0.45 \mu\text{m}$, ma che hanno la capacità di assorbire le frequenze in questione e quindi di migliorare la qualità del colore sul singolo pixel. Questo sistema aumenta molto la sensibilità del sensore e migliora la qualità visiva finale dell'immagine.

- **Microlenticular Arrays**

Tecnica largamente utilizzata nei sensori moderni e inventata dalla Sony, gli array microlenticolari hanno uno strato di "lentine" concentratrici fatto formare in modo controllato in fase di fabbricazione immediatamente sopra i singoli pixels (fig. 6.1.3). Questo permette di distorcere il fascio luminoso e farlo puntare solo nelle zone fotosensibili. L'attuale precisione nei sistemi di fabbricazione microelettronici permette di triplicare la qualità dell'immagine e la resa del sensore creando array di microlenti uniformi.

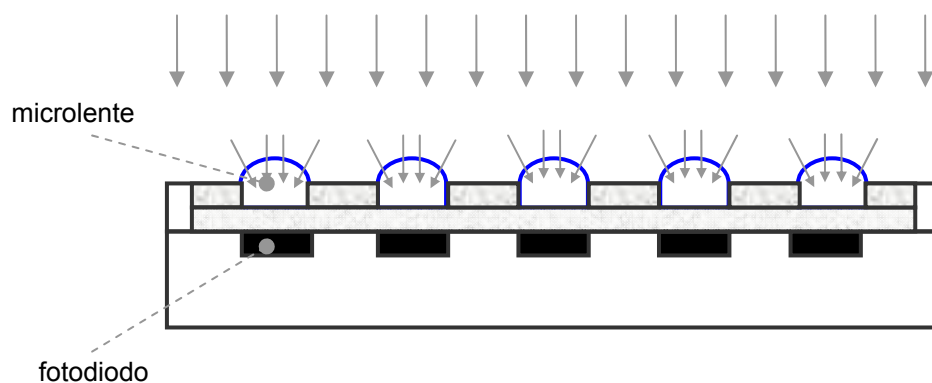


fig. 6.1.3 – Microlenticular Array

- **High Speed CCDs**

Per raggiungere alti frame rate, necessari alla corretta visualizzazione delle immagini in movimento, esistono molte architetture possibili ma il problema principale è costituito dall'amplificatore on-chip. Questo deve essere progettato per utilizzare meno potenza possibile e quindi dissipare meno calore (altrimenti l'immagine potrebbe essere "macchiata" in modo localizzato intorno all'area nella quale l'amplificatore scalda di più) lavorando a velocità comunque sostenute. Oltre alla costruzione di amplificatori sempre più sofisticati, la strada generalmente più utilizzata architetturealmente è quella di duplicare o triplicare l'output del sensore, aumentando di fatto di un fattore tre il frame rate in uscita (più alto è il parallelismo, più alta è la velocità). Questo però porta a dover scontrarsi con problemi non banali come il processing di sorgenti multiple, il sincronismo di clock e il rumore triplicato che deriva dalla stessa natura capacitiva del CCD.

6.2. Fujifilm SuperCCD

L'idea del *SuperCCD* della *fujifilm* è questa: vengono utilizzati dei fotodiodi di forma ottagonale ad incastro a nido d'ape trasformando di fatto il concetto di pixel (fig. 6.2.1). In questo modo la risoluzione dell'immagine è estrema, data la altissima vicinanza spaziale dei sensori. Inoltre il comportamento dell'occhio umano (costituito da circa 180 milioni di celle ottiche elementari, 60 milioni delle quali lavorano sul colore) alle alte frequenze è migliore lungo gli assi orizzontale e verticale che lungo le direzioni a 45°

(per ragioni evolutive legate alla necessità di focalizzare l'attenzione in modo rapido su particolari punti del campo visivo).

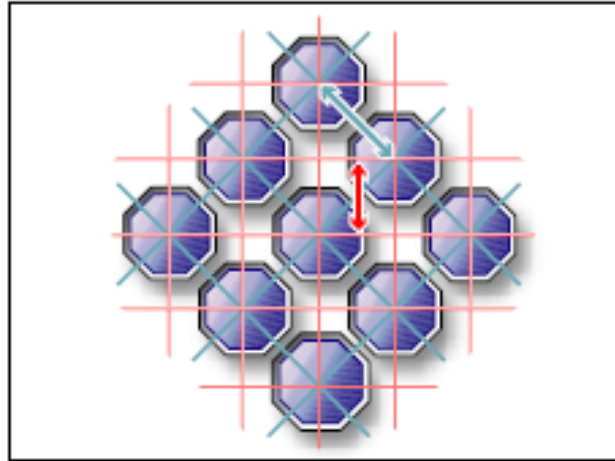


fig. 6.2.1 – Struttura del SuperCCD di Fuji

Il *SuperCCD*, quindi, aumenta la definizione dell'immagine percepibile dall'occhio umano distribuendo i singoli pixel a 45° e disponendoli a nido d'ape, fattori che portano alla concentrazione dell'informazione nelle zone più sensibili del campo visivo. I vantaggi che provengono da questa particolare architettura sono:

- **Sensibilità, rapporto S/R e range dinamico aumentati:** lo spazio tra i pixel è ridotto al minimo).
- **Altissima risoluzione sugli assi orizzontale e verticale.**
- **Possibilità di effettuare la lettura dei dati sia nella direzione verticale che in quella orizzontale,** aumentando il frame rate complessivo. In questo modo, inoltre, ogni linea orizzontale può comprendere tutta l'informazione RGB e non solo quella relativa a un colore.

- **Richiesto il solo shuttering elettronico**, che permette di riprendere in continuo ed è estremamente preciso.

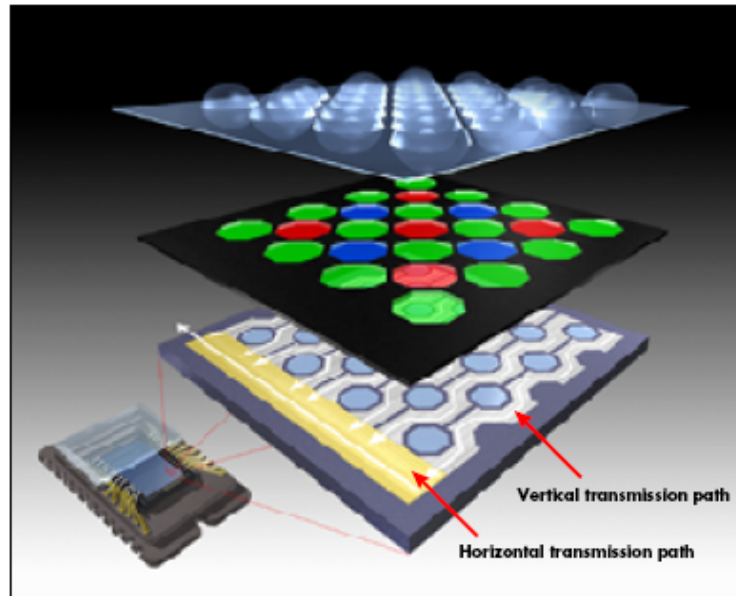


fig. 6.2.2 – Struttura a strati del SuperCCD Fuji

I *SuperCCD* della fuji (fig. 6.2.2) sono oggi alla loro quarta generazione. Gli array del sensore sono di tipo microlenticolari con lentine poste a nido d'ape sul singolo pixel. Inoltre in questa evoluzione sono molto più vicini alla pellicola fotografica non solo come qualità (ne esistono versioni fino a 20 megapixel) ma anche come concezione: per simularne il comportamento (descritto nell'introduzione al capitolo), infatti, sono stati affiancati due tipi di rilevatori sullo stesso pixel, ognuno con differenti caratteristiche di sensibilità luminosa. In particolare la nuova struttura S-R è composta da sensori a bassa sensibilità ma migliore risposta a frequenze d'onda di tipo UV, e da sensori ad alta sensibilità complessiva. Il mescolamento opportuno dell'informazione catturata dai due rilevatori permette di migliorare la risposta generale del sensore e di avvicinarsi alla qualità della pellicola alleviando effetti di colore discretizzato.

6.3. Sony EXview – Super HAD CCD

I CCD della Sony sono stati pensati nella seconda metà degli anni 70. Il primo prototipo era un CCD a 142 pixel orizzontali, evolutosi dopo qualche mese in un sistema di tipo TCC con sensori a 110 *kpixels*. Nel 1984 venne per la prima volta introdotto l'utilizzo di architetture di tipo HAD (Hole Accumulation Diode). Questa particolare soluzione integra un canale di accumulazione sulla superficie del substrato di silicio, aumentando molto così la sensibilità del fotodiodo e riducendo la corrente generata dallo strato superiore del sensore. Il sistema permette in pratica di ottenere immagini nitide controllando l'effetto di sovraesposizione.

Ulteriore innovazione fu il primo utilizzo dello *shutter* elettronico, nel 1987. I successivi miglioramenti introdotti nella produzione di scala della Sony sono stati (in ordine cronologico):

- **1989 – Array Microlenticolari** (introdotti dalla Sony, poi ripresi dalla maggior parte dei costruttori e oggi tecnologia base per tutti i tipi di sensori). Questa soluzione era la naturale risposta alle prime miniaturizzazioni “spinte” dei processi di fabbricazione dei wafer di silicio drogati. La concentrazione dell'energia luminosa sulle aree sensibili operata da queste microlenti ha consentito di migliorare notevolmente (fattore 3 reale) la qualità dell'immagine e la risoluzione, permettendo di eliminare (o meglio di alleviare) i gap di informazione mancante tra pixel continui.
- **1997- Super HAD CCD**. Consiste in un miglioramento strutturale degli array microlenticolari: il processo di trattamento delle microlenti è ottimizzato per

ridurre al minimo la perdita di informazione luminosa dovuta alla non corretta focalizzazione del raggio sulle aree sensibili (fig. 6.3.1, 6.3.2).

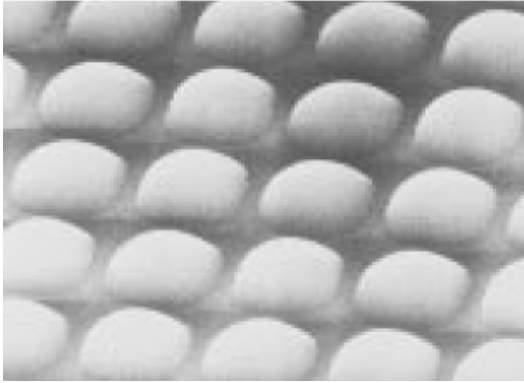


fig. 6.3.1 – Array Microlenticolari classici al microscopio

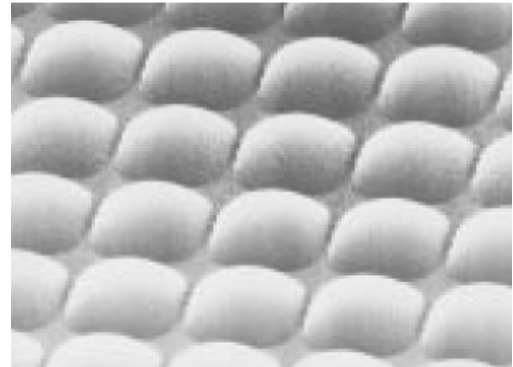


fig. 6.3.2 – Array Microlenticolari nel SuperHAD CCD al microscopio

In questo modo il rapporto segnale rumore a valle del sensore è stato notevolmente migliorato (di un fattore due).

- 1998 – New Structure CCD.** Passo importante nella fabbricazione dei sensori, gli NS-CCD integrano due sistemi di “lentine” (internal/external microlens arrays), una delle quali posta sotto il filtro di colore, cioè il film protettivo del sensore (fig. 6.3.3). Questo permette una

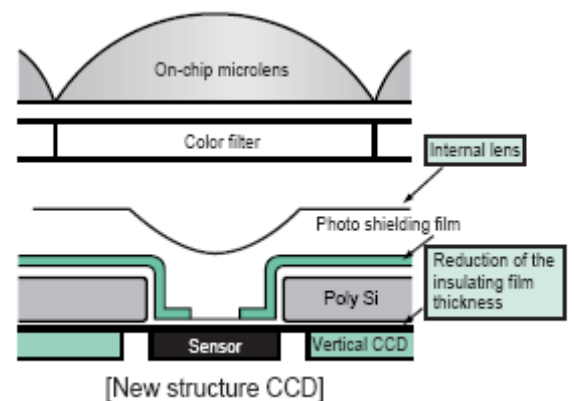


fig. 6.3.3 – Schema del New Structure CCD

concentrazione migliore della luce sul sensore, permettendo una condensazione altissima dell'informazione luminosa e riducendo notevolmente lo "smear" delle immagini finali (alterazione da fonti luminose che crea artefatti soprattutto in condizione di scarsa luminosità del quadro).

- **1998 – Exview HAD CCD.** In questa versione sono stati molto migliorati gli aspetti di sensibilità del CCD a radiazioni luminose di tipo infrarosso. Rendendo il sensore capace di rilevare (grazie a processi di thinning del substrato di silicio e all'utilizzo di tecniche di drogaggio del silicio particolari) questa parte di informazione visiva, il miglioramento è forte in termini di qualità dell'immagine finale.

6.4. Foveon Sensors

Anche se non sono propriamente CCD (la base tecnologica è CMOS), i sensori *Foveon* meritano di essere menzionati perché costituiscono una vera e propria

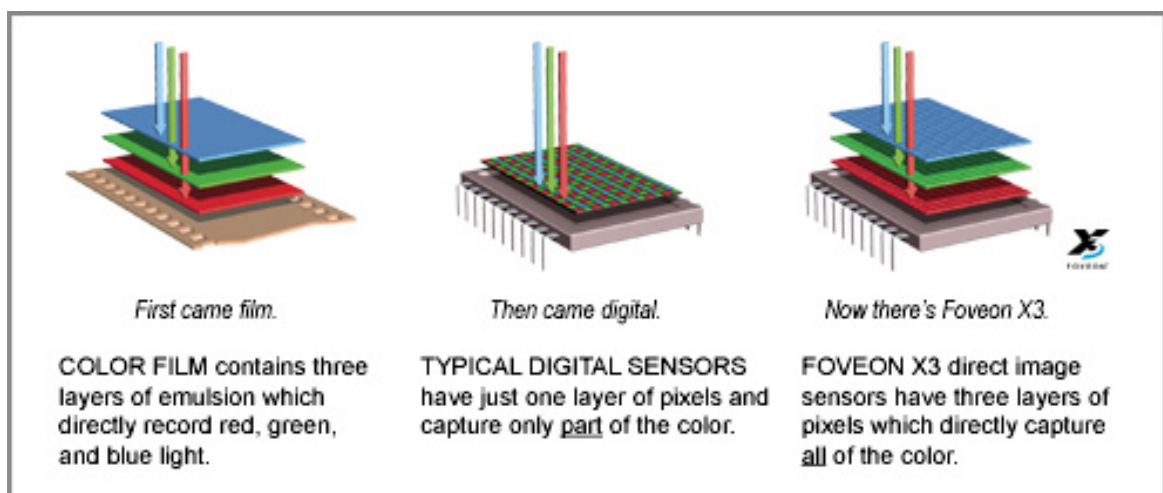


fig. 6.4.1 – Tecnologia dei sensori Foveon

innovazione nel campo degli image sensors dalla nascita dei primi sistemi accoppiati in carica.

Nati nel 1997 dal progetto del Dr. Carver Mead (fondatore nello stesso anno della società Foveon Inc. – www.foveon.net), un pioniere dell'elettronica *solid-state*, nel *VLSI design*, e professore emerito al “*California Institute of Technology*”, questo particolare tipo di sensore è di tipo CMOS, ma con una caratteristica del tutto nuova: 3 strati sovrapposti di rilevazione del colore (fig. 6.4.1). L'approccio è quello di imitare la pellicola fotografica attraverso l'utilizzo di tre gruppi di sensori distinti e sovrapposti. Questo permette di catturare per ogni singolo pixel non porzioni distinte di informazione luminosa (come nei CCD), ma tre singoli pixel completi ognuno contenente un colore diverso (come per la pellicola).

Attualmente il processo produttivo di questi sensori lavora a 0.18 μm e il sensore più evoluto raggiunge risoluzioni di 10 milioni di pixel (3.4 per il singolo colore).

La qualità visiva di questo tipo di sensore è paragonabile a quella analogica, la resa cromatica e la risoluzione sono ottime.

C'è da dire però che questa tecnologia (1997) soffre ancora di grossi difetti di gioventù. Non ancora ottimizzata per prestazioni ottimali (che però promette di ottenere presto) la tecnologia *foveon* soffre nelle condizioni di scarsa luminosità, rendendo l'immagine ricca di artefatti e “bloomed area”. Altro punto a suo sfavore è (ma pare sia stato risolto dai nuovi sensori X3) la degradazione delle prestazioni del sensore nel tempo, cosa che riduceva la vita utile di un terzo rispetto alle principali concorrenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Whitaker, B. Benson. "Standard Handbook of Video and Television Engineering (4th edition)", McGraw-Hill, 2003.
- [2] ----- . "Charge Coupled Devices". Eastman Kodak Company, ISS Solution. Revision No.1, May 2001.
- [3] ----- . "Fuji SuperCCD White Papers". Fuji Photo Film Co., LTD, 2004.
- [4] ----- . "Total CCD Production Tops 100 Million Pieces", TechnoWorld for Sony Peripherals Corp, 2001.
- [5] Paul M. Hubel, John Liu, and Rudolph J. Guttosch. "Spatial Frequency Response of Color Image Sensors: Bayer Color Filter and Foveon X3", Foveon Inc, 2003.
- [6] Brian L. Benamati. "In Search of the Ultimate Image Sensor", Photonics Spectra, Laurin Publishing, 2001